

金属泡沫型微粒捕集器中颗粒物沉积特性试验研究

张子鼎¹, 梁兴雨¹, 王亚军¹, 王月森¹, 李振国², 张志军³

(1. 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 300072, 天津; 2. 中国汽车技术研究中心有限公司, 300300, 天津; 3. 中国北方发动机研究所, 300400, 天津)

摘要: 为了探究金属泡沫中颗粒物的沉积过程及沉积特性,自行设计开发了颗粒物快速加载系统,结合体式显微镜图像表征方法,在颗粒物加载量为 1.5 g/h 条件下研究了平均孔径为 350 μm 的径向型金属泡沫微粒捕集器中颗粒物沉积特性随时间及沉积深度的变化关系。结果表明:燃烧器生成的颗粒物与实际发动机的颗粒物粒径相近,金属泡沫捕集器沉积过程中始终存在深床沉积;颗粒物质量沉积速率先增加后稳定,压降增加先快后慢,碳烟质量浓度捕集效率可达 82%;大部分颗粒物沉积在第 1 层滤芯中,末端第 1 层滤芯上堵塞最严重,颗粒物覆盖面积逐层减小,沉积均匀度沿径向递减;圆筒上颗粒物覆盖面积占比沿进气方向逐渐增大,第 1 层最末端近 100%,由内至外逐层减小,孔隙则逐层增大。研究结果揭示了金属泡沫型微粒捕集器中颗粒物动态沉积过程及沉积特性变化规律,可为金属泡沫型微粒捕集器后续研究提供理论基础。

关键词: 金属泡沫;微粒捕集器;颗粒物;沉积特性

中图分类号: TK427 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202007010 **文章编号:** 0253-987X(2020)07-0075-09



OSID 码

Experimental Study on the Deposition Characteristics of Particulate Matter in Metal Foam Particulate Filter

ZHANG Ziding¹, LIANG Xingyu¹, WANG Yajun¹, WANG Yuesen¹,
LI Zhenguo², ZHANG Zhijun³

(1. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. China Automotive Technology Research Center Co. Ltd., Tianjin 300300, China;

3. China North Engine Research Institute, Tianjin 300400, China)

Abstract: To investigate the deposition process and deposition characteristics of the particulates in metal foam, a rapid loading system for particulates was designed. Combined with the stereo microscope image characterization method, the relationships of particle deposition characteristics in the radial metal foam (the average diameter of pores is 350 μm) particulate filter with time and depth were studied. The results show that the diameters of the particles from the burner are similar to that from the actual engine, and there is always a deep-bed filtration during the particle deposition in the metal foam. The deposition rate of the particles increases first with time and then becomes stable. The pressure drop increases rapidly first and then slows down. The

filtration efficiency of the soot is up to 82%. Most of the particles are deposited in the first layer of the filter, which has the most severe blockage, the coverage area is reduced layer by layer, and the uniformity of deposition decreases along the radial direction. The proportion of the area covered by the particles on the sleeve gradually increases along the direction of the exhaust gas flow. At the end of the first layer, the proportion of the area covered by the particles is up to 100%. The coverage of the particles is reduced from the inside to the outside, and the pores become larger layer by layer. The results reveal the dynamic deposition process of the particulates and the change rule of deposition characteristics in the metal foam particulate filter, which provides a theoretical basis for the subsequent research of the metal foam particulate filters.

Keywords: metal foam; particulate filter; particulate matter; deposition characteristics

目前,发动机微粒捕集器是减少发动机颗粒物排放的重要后处理设备,但其使用最广泛的陶瓷基壁流式滤芯,却具有易碎、加工困难、成本高等缺点。新型材料金属泡沫具有孔隙率高、渗透性好、比表面积较大、易加工、抗冲击性好等优点,可以有效降低排气背压,提高燃油经济性。

目前对于金属泡沫微粒捕集器的研究主要集中在捕集特性方面,Koltsakis等发现金属泡沫作为涂覆催化剂的柴油机微粒捕集器(CDPF)时,在减小过滤体积及被动再生方面具有出色的潜力^[1-4]。Lee等将金属泡沫的孔径从 580 μm 变换到 800 μm ,其捕集效率从 90%降低到 50%^[5]。Cho等实验发现金属泡沫最大可达到 80%的颗粒物质量(PM)捕集效率^[6]。Myung等设计了径向过滤型的金属泡沫滤芯,其相比于轴向滤芯拥有更大的过滤面积,且捕集效率达到 60%~80%^[7-9]。

金属泡沫与壁流式滤芯同属于多孔介质,目前研究多集中于壁流式滤芯。壁流式滤芯中一般有深床沉积、过渡阶段和滤饼层阶段 3 个沉积阶段^[10],有惯性碰撞、扩散沉积、流线拦截以及重力沉积 4 种捕集机制^[11-15]。Daido等发现只有在初始时,颗粒才能渗透到壁流式滤芯壁面深处,随后在壁面入口处不断积累,最终将壁面孔隙堵塞^[16]。孟忠伟等提出颗粒沉积过程中的过渡阶段可进一步分为“长树”和“搭桥”阶段^[17-20]。

目前对于金属泡沫内颗粒物沉积特性的研究较少,而本文研究对于降低排气背压、提高燃烧效率以及制定再生策略等方面均有积极意义。

本实验通过快速颗粒物加载系统,研究金属泡沫中颗粒物沉积特性,提出利用体视显微镜表征分析金属泡沫上颗粒物宏观沉积的方法,并探究颗粒物在金属泡沫微粒捕集器中的动态沉积过程。

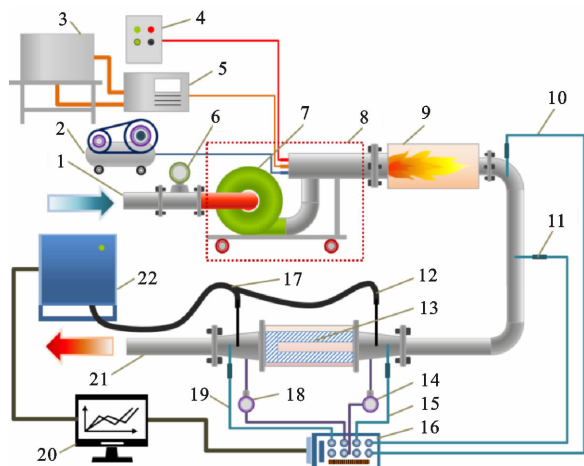
1 实验系统

1.1 快速颗粒物加载系统及实验方法

本实验中的快速颗粒物加载系统如图 1 所示。系统主要通过管路中封装的金属泡沫进行颗粒物捕集,并分别于燃烧室后 20 cm 处、燃烧器与滤芯中间处、滤芯前后这 4 个位置安装温度传感器,在滤芯前后 2 个位置安装压力传感器。通过 Labview 数据采集程序对各传感器数据进行记录,AVL-415 烟度计用来测得微粒捕集器前后的碳烟质量浓度,捕集效率 η 计算公式为

$$\eta = \frac{W_b - W_a}{W_b} \quad (1)$$

式中: W_b 为滤芯前面位置处碳烟质量浓度; W_a 为滤芯后面位置处碳烟质量浓度。



1—进气道;2—空压机;3—油箱;4—点火控制柜;5—油耗仪;6—气体体积流量计;7—风机;8—燃烧器;9—燃烧室;10—燃烧室后温度传感器;11—管路中段温度传感器;12—滤芯前采样管;13—金属泡沫滤芯;14—滤芯前压力表;15—滤芯前温度传感器;16—数据采集系统;17—滤芯后采样管;18—滤芯后压力表;19—滤芯后温度传感器;20—计算机;21—排气道;22—烟度计。

图1 快速颗粒物加载系统简图

台架运行参数如表 1 所示,表 2 为测量设备表。

表 1 快速颗粒物加载系统运行参数表

油耗量/ (kg·h ⁻¹)	进气流量/ (kg·h ⁻¹)	空燃比	油箱供油 压力/MPa	空压机喷油雾化 压力/MPa	进气温度 /℃	捕集器前面位 置处温度/℃	捕集器后面位 置处温度/℃	颗粒物加载量 /(g·h ⁻¹)
1.0±0.1	20.0±1.0	20	0.1	0.2	22	330~380	300~350	1.5

表 2 测量设备表

气体涡轮流量计		K 型热电偶温度传感器		压力传感器		电子天平		FC2210 油耗仪	
量程/(m ³ ·h ⁻¹)	精度/%	量程/℃	精度/%	量程/kPa	精度/%	量程/kg	精度/g	量程/(kg·h ⁻¹)	精度/%
10~100	1.5	0~1 300	0.75	0~20	0.5	0~2	0.01	0.1~70.0	0.5

1.2 金属泡沫滤芯

本实验的金属泡沫滤芯为平均孔径为 350 μm (孔隙率 86%)的铁镍合金,图 2 为全新的金属泡沫组织。为保证较大的过滤面积,本实验将滤芯设计为如图 3 所示的空心且一端封闭的圆筒状结构,其内径 $D_0=60$ mm,外径 $D_1=110$ mm,总长度 $L=200$ mm。圆筒壁为 5 层嵌套而成,每层壁厚为 5 mm;末端为 5 层圆片叠加而成,每层厚度为 5 mm。

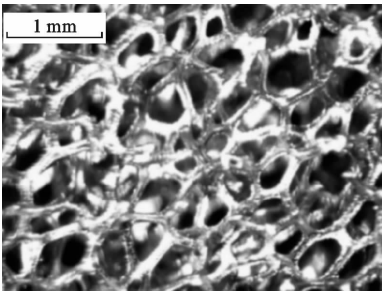


图 2 金属泡沫滤芯组织

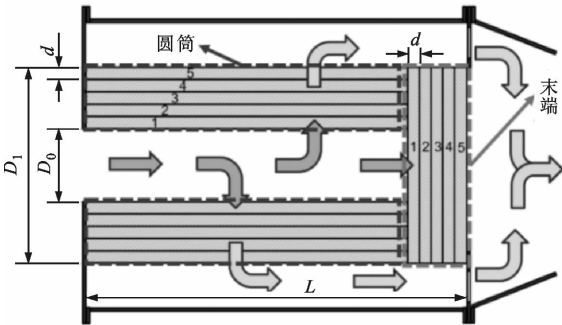


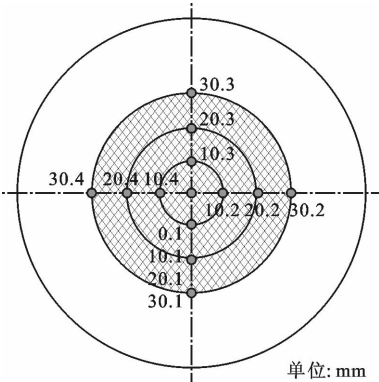
图 3 微粒捕集器简图

排气从圆筒开口端进入,分别经过轴向与径向壁面进行过滤。按照与排气接触的先后顺序,将金属泡沫由内至外标记为 1~5 层。每次实验结束前后,将金属泡沫滤芯放入真空干燥箱中加热到 200℃进行 30 min 的干燥处理,随后待金属泡沫滤芯冷却后利用电子天平进行称量,比较颗粒物沉积质量

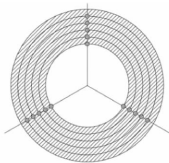
变化。

1.3 显微镜图像分析表征方法

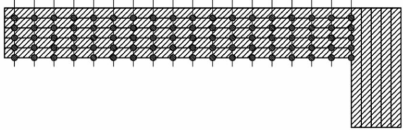
每次实验为 20 min,共 9 组,每次实验后使用 AmScope 体视显微镜 3.0X 观测各片金属泡沫表面上颗粒物覆盖状况。末端圆片上的拍照取点位置如图 4a 所示,每层末端圆片的实际半径为 55 mm,但其与排气接触的范围是半径为 30 mm 的圆,从圆心开始,分别沿半径在 10、20、30 mm 处选取互成 90°的 4 个点;如图 4b 所示,在圆筒各层每隔 10 mm 沿内壁一周每隔 120°取一点,进行显微镜拍照,分析颗粒物动态沉积过程。为保证每次实验后显微镜各拍照点位置一致,本实验在金属泡沫圆片边缘一周各成 90°标记 4 个定位点,载物台上标记横纵坐标轴,放置金属泡沫时将金属泡沫 4 个定位点与坐标轴线以特定的方向对准。观察不同半径上的图像



(a)末端圆片部分



(b)圆筒部分周向



(c)圆筒部分沿进气轴向

图 4 显微镜拍照点示意图

时,将金属泡沫根据刻度线进行平移。

实验结束后从金属泡沫表面刮取颗粒物样品,利用透射电镜(TEM)分析颗粒物粒径,并与柴油机颗粒物粒径作对比。

利用 Image J 软件进行图像分析。颗粒物为深灰色,未沉积颗粒物的金属泡沫为亮银色,孔隙为黑色,经过二值化处理之后,颗粒物与金属泡沫之间具有较明显的差异,由此可以计算出各部分的面积。

颗粒物覆盖面积占比

$$a = \frac{A_1}{A_0} \quad (2)$$

孔隙截面积占比

$$b = \frac{A_2}{A_0} \quad (3)$$

式中: A_0 为图像整体面积; A_1 为颗粒物沉积面积; A_2 为孔隙截面积。

2 颗粒物沉积整体分析

2.1 颗粒物沉积过程分析

图5是燃烧器颗粒物照片,图6是燃烧器颗粒物粒径分布。颗粒物基本碳粒子的粒径均值为29.81 nm,粒径分布在10~60 nm之间,16~44 nm区间内的碳粒子数占总数的90.02%。Lapuerta等发现柴油机燃用普通柴油所产生的颗粒物基本碳粒子粒径在5~60 nm之间^[21-22],Xu等发现柴油机颗粒物基本粒子粒径均值在21.8~26.4 nm之间^[23],

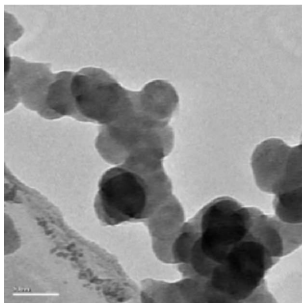


图5 燃烧器颗粒物照片($\times 40\ 000$)

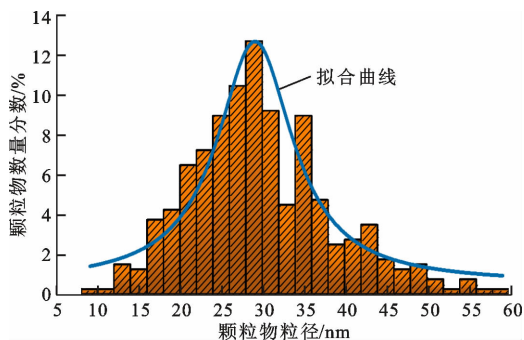


图6 燃烧器颗粒物粒径分布

与本文测得的颗粒物基本碳粒子粒径分布类似,可近似认为本文的燃烧器能够产生与实际柴油机类似的颗粒物。

图7是选取不同时间段的各层金属泡沫表面上同一点处的颗粒物显微镜照片。由图可以看出,第1层上颗粒物沉积量随时间的变化是最大的,首先流经金属泡沫附近的颗粒物被其各支柱所捕获,附着后逐渐累积,较小的孔四周的颗粒物串不断生长,直至互相接触,在小孔上呈现“搭桥”的状态,后来的颗粒物继续被“桥”型结构捕获,直至将小孔完全堵塞。大孔上的“桥”型结构生长缓慢,气流会将质量极轻的颗粒物吹扫掉。到了后期,大孔周围由于颗粒物的不断附着,孔径不断变小,后续的颗粒物有了稳固的附着点,才逐渐形成“桥”型结构,并逐渐沉积直至堵塞大孔。最后,颗粒物在金属泡沫表面继续累积,直至形成滤饼结构。该沉积过程与西华大学孟忠伟教授提出的将3个阶段中的过渡阶段分为“长树阶段”及“搭桥阶段”的理论较为类似。

第2层上同时段颗粒物附着量明显少于第1层,但也经历了小孔上先“搭桥”后堵塞的过程。由于同时段第1层上孔隙堵塞严重,所以流入到后边的颗粒物减少,不足以使第2层也完成大孔“搭桥”的过程。最终第2层上小孔被堵塞住,大孔的孔径变小,但未堵塞。

在第3、4、5层上,由于前两层的过滤效应,致使后3层的小孔上都尚未形成“搭桥”,颗粒物仅仅在金属泡沫支柱上附着,颗粒物沉积量随层数的靠后而减少。

在颗粒物沉积的初始阶段,观察到颗粒物深入地渗透进金属泡沫中,沉积到各层上,说明一开始是处于深床沉积模式。从初始阶段到过渡阶段再到第1层形成滤饼层阶段的整个过程中,观察到依然有部分小颗粒深入渗透沉积在后4层上,说明金属泡沫微粒捕集器在过渡阶段以及滤饼层过滤阶段也同时存在深床沉积的现象。

因此,金属泡沫中的颗粒物沉积过程可分为以下3个阶段:

(1)深床沉积阶段,颗粒物由于各种捕集机制而深入地附着在金属泡沫各层上;

(2)过渡阶段,金属泡沫上颗粒物串快速生长,在孔隙上“搭桥”,依次将小孔到大孔堵塞住,此阶段在第1层最为明显,此时深床沉积依然存在;

(3)滤饼层阶段,在第1层上形成滤饼层结构,但仍有部分小颗粒进入后几层,深床沉积仍然存在。

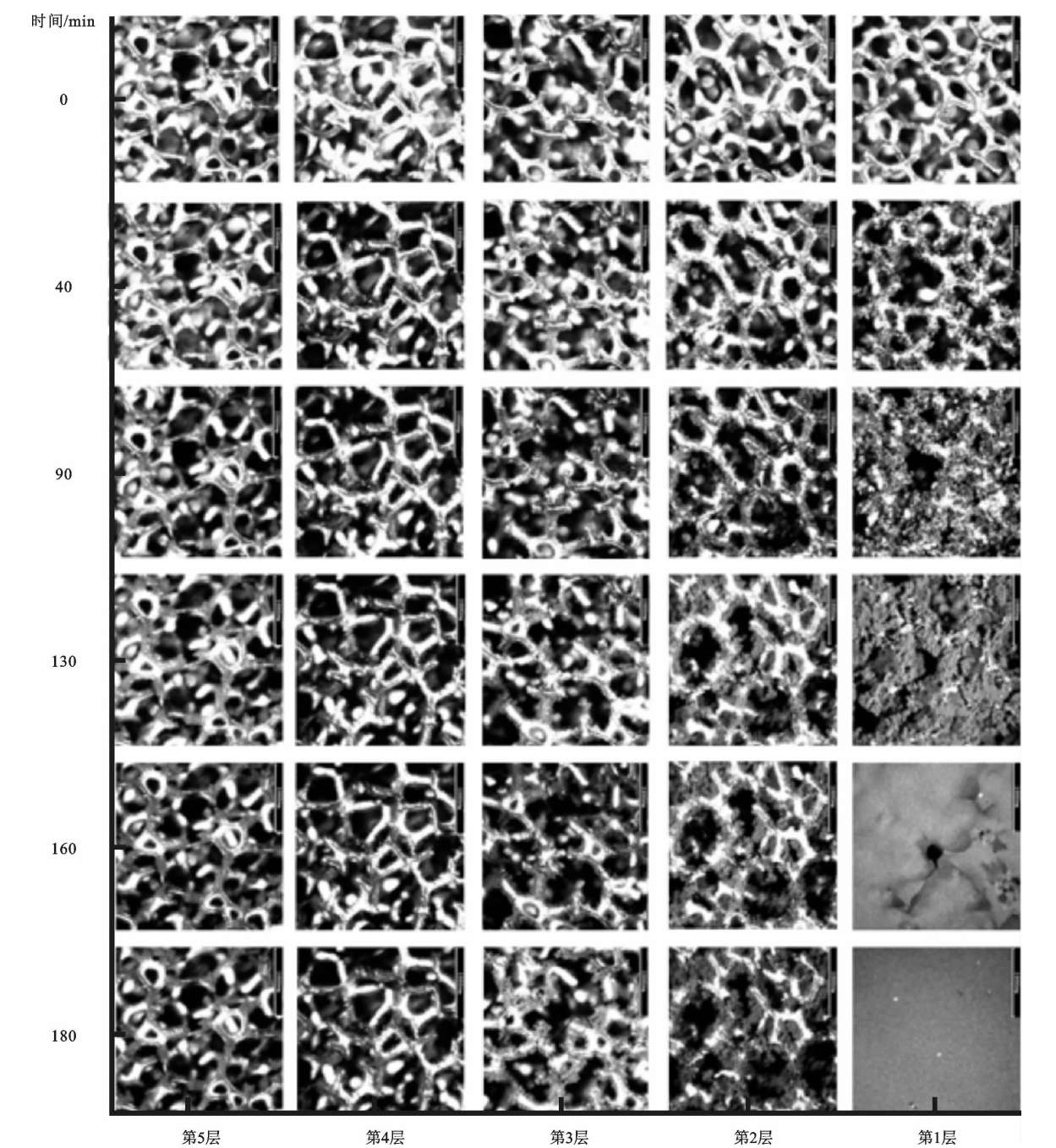


图 7 颗粒物沉积动态变化图

2.2 颗粒物沉积特性分析

图 8 给出了颗粒物沉积速率随时间的变化关系,图 9 给出了金属泡沫滤芯整体前后碳烟捕集效率随时间的变化关系。

在初始阶段,由于金属泡沫白载体孔隙率及金属泡沫间的平均孔径均较大,所以颗粒物沉积量较少,颗粒物沉积速率较慢。随着时间的推进,金属泡沫上不断附着颗粒物,颗粒物沉积速率迅速提升,直至形成滤饼层结构,沉积速率趋于稳定在约 1.6 g/(L·h)。碳烟捕集效率不断增长,到形成滤饼层时

捕集效率可以达到 82% 以上。

微粒捕集器前后压降及压降变化速率随时间的变化关系如图 10 所示。随着时间的增加,微粒捕集器前后压降不断增加,且压降增加速率也不断提升。在初始阶段,滤芯孔隙率较大,故前后压降较低,随着颗粒物不断积累,压降逐渐增加。到了过渡阶段,压降快速升高,且压降升高速率也逐渐增大。到滤饼层阶段,压降升高速率下降,压降增长逐渐减缓。180 min 时压降相比 20 min 时提升 200 Pa 左右。

图 11 给出了实验后金属泡沫滤芯的颗粒物沉

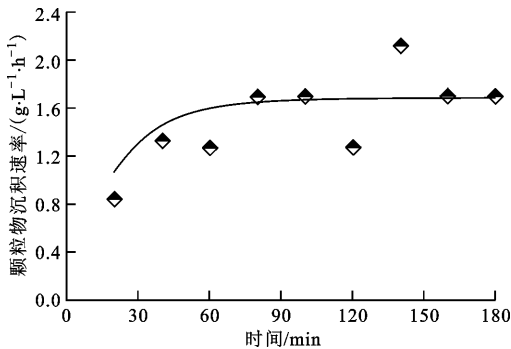


图 8 颗粒物沉积速率随时间的变化

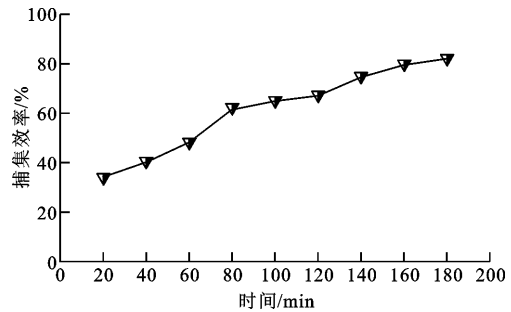


图 9 碳烟捕集效率随时间的变化

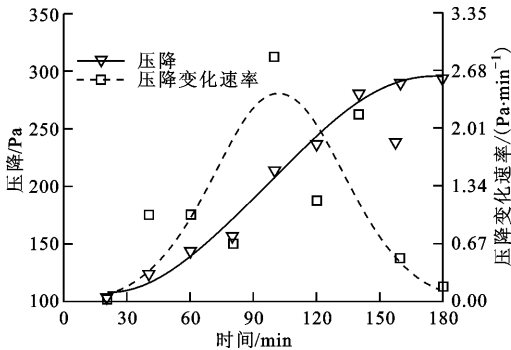


图 10 微粒捕集器前后压降及压降变化速率随时间的变化

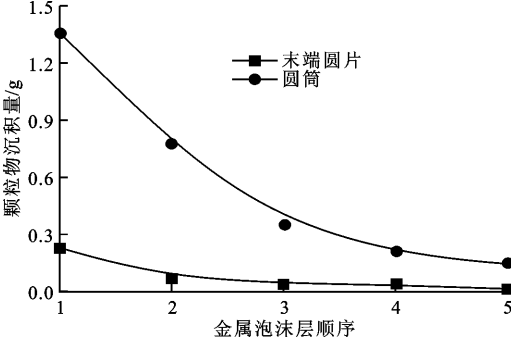


图 11 实验后金属泡沫滤芯的颗粒物沉积量

76.9%；在圆筒套筒上，第 1、2 层沉积质量占总沉积质量的 75.1%。由此可见，在金属泡沫中，与排气先接触的部分会沉积大部分颗粒物，后续滤芯对颗粒物捕集贡献较小。

3 颗粒物沉积局部分析

3.1 末端圆片图像分析

图 12 为末端 5 层圆片金属泡沫滤芯在所有实验完毕之后的照片。图 13、图 14 为末端不同层面上各点颗粒物的平均覆盖面积占比 a_m 及平均孔隙

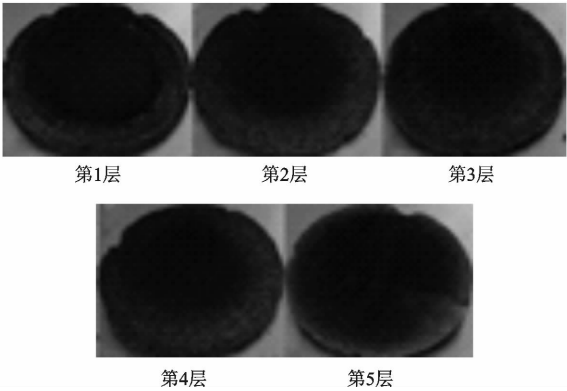


图 12 实验完毕后末端 5 层圆片金属泡沫滤芯照片

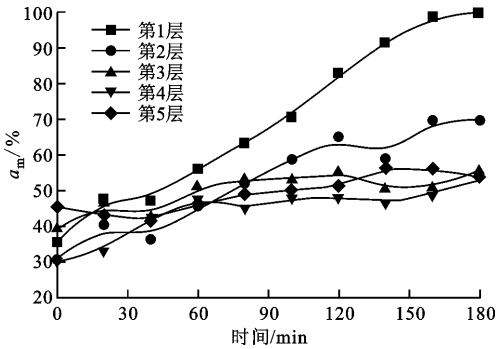


图 13 末端各层中颗粒物平均覆盖面积占比随时间的变化曲线

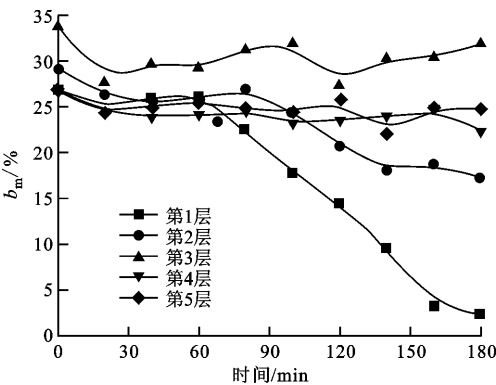


图 14 末端各层中平均孔隙截面面积占比随时间的变化曲线

积量。由于圆筒部分过滤体积大，所以在圆筒部分颗粒物沉积量占总沉积量的 87.9%。整体来看，第 1、2 层上沉积了大部分的颗粒物。在末端圆片上，第 1、2 层沉积的颗粒物质量占总沉积质量的

截面积占比 b_m 随时间的变化曲线。由于初始拍照时金属泡沫空白载体上有部分阴影,所以会有一个颗粒物覆盖面积占比初始值,此初始值与金属泡沫各层本身反光程度有关。

图 13 中第 1 层的颗粒物平均覆盖面积占比迅速提升,增长速率均匀,各沉积阶段之间无明显区别,当形成滤饼层结构时,颗粒物平均覆盖面积占比增长放缓,接近达到 100%。随着时间的推进,图 14 中第 1 层的孔隙截面积相对于其他 4 层大幅减小,至形成滤饼层时,平均孔隙截面积占比几乎为 0。

第 2 层的颗粒物平均覆盖面积占比约为 70%,平均孔隙截面积占比从白载体时的近 30% 降到 17% 左右。第 3、4、5 层上颗粒物覆盖面积增长幅度逐渐减小,且与第 1、2 层有明显差距。后 3 层的平均孔隙截面积占比随时间变化不大。

图 15、图 16 给出了末端各层上颗粒物平均覆盖面积占比以及平均孔隙截面积占比沿径向的分布。由图 15 可以看出,各层上颗粒物覆盖程度不均匀,第 1 层沿径向颗粒物平均覆盖面积占比差距不超过 1%,说明该层颗粒物沉积最为均匀,随后各层上圆心处颗粒物沉积最多,沿径向逐渐降低。由图

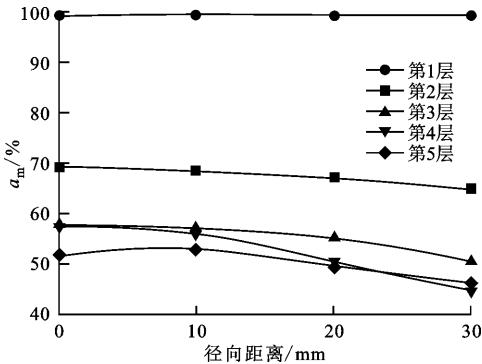


图 15 末端各层中颗粒物平均覆盖面积占比沿径向的分布

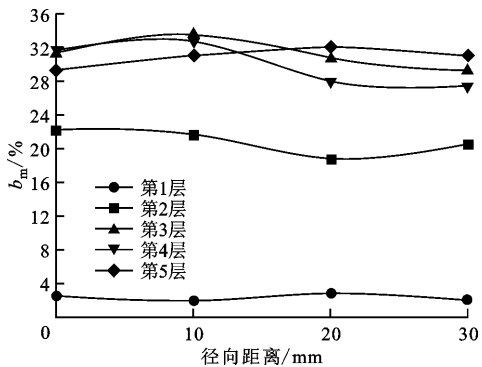


图 16 末端各层中平均孔隙截面积占比沿径向的分布

16 可以看出,各层的平均孔隙截面积占比沿径向相差不大。

3.2 圆筒部分图像分析

图 17、图 18 为不同层面上颗粒物平均覆盖面积占比及平均孔隙截面积占比沿进气轴线的分布。图 19、图 20 为圆柱套筒颗粒物平均覆盖面积占比及平均孔隙截面积占比云图。从图 17、图 19 中可以看出,各层颗粒物覆盖面积基本上沿进气轴线逐渐增加。第 1 层上颗粒物覆盖面积占比均在 90% 以上,在最末端达到近 100%,比该层前端提高约 9%。在后 4 层上,颗粒物覆盖面积随进气方向增加幅度不大,但是颗粒物覆盖面积逐层递减。

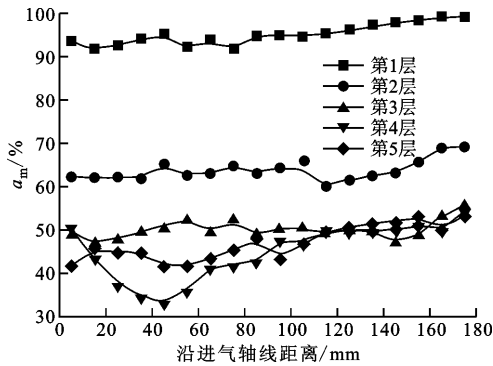


图 17 圆筒各层中颗粒物平均覆盖面积占比沿进气轴线的分布

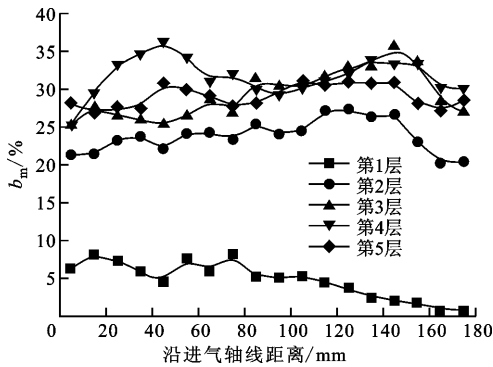


图 18 圆筒各层中平均孔隙截面积占比沿进气轴线的分布

图 18、图 20 中第 1 层上孔隙截面积占比沿进气方向逐渐下降,前端孔隙截面积占比为 5% 左右,末端降到接近 0,说明在整层上基本都已形成滤饼层结构。由图 3 滤芯外形可知,第 1 层最末端处与圆片部分紧密相连,形成死角(直角),流到末端的排气在此处流速降低,使得更多颗粒物在末端沉积。其他 4 层上孔隙截面积占比增长不明显,孔隙截面积占比由内至外逐层增加,堵塞程度减小。

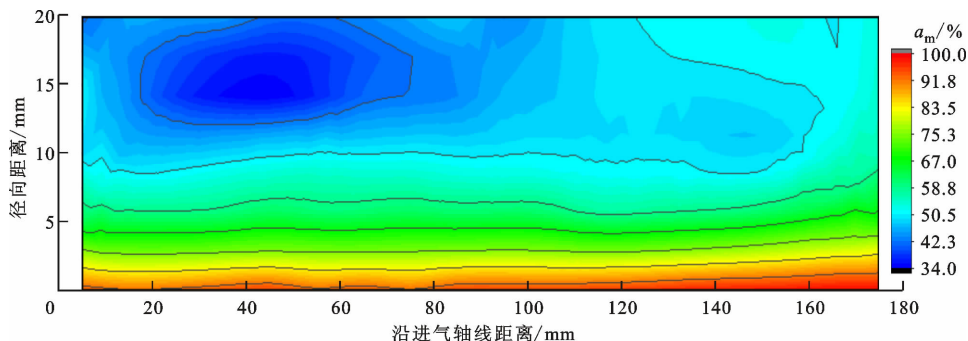


图 19 圆柱套筒颗粒物平均覆盖面积占比云图

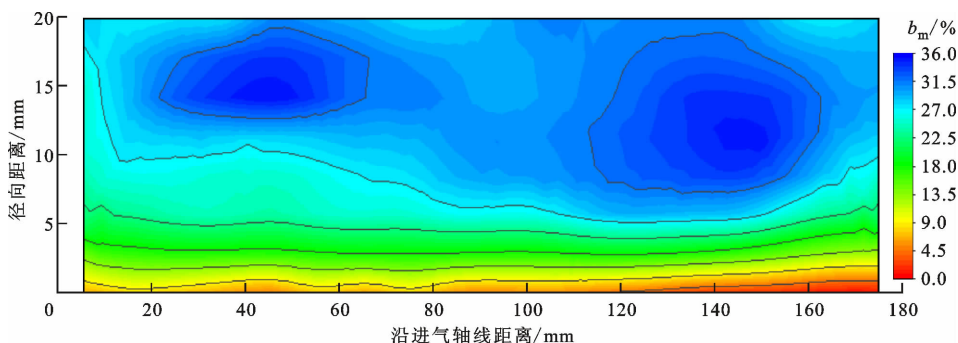


图 20 圆柱套筒平均孔隙截面面积占比云图

4 结 论

本文基于颗粒物快速加载系统,研究了金属泡沫型微粒捕集器中颗粒物沉积特性,得出如下结论。

(1)本实验燃烧器产生的颗粒物粒径分布与柴油机的类似,可近似代替实际柴油机的颗粒物。金属泡沫中颗粒物沉积过程与传统壁流式滤芯略有不同,分为深床沉积、过渡阶段、滤饼层阶段3个阶段,但是在3个阶段中始终存在深床沉积现象。

(2)随着时间的增加,颗粒物质量沉积率先增加后稳定在约 $1.6\text{ g}/(\text{L}\cdot\text{h})$;碳烟质量浓度捕集效率达到82%以上;随着时间的增加,微粒捕集器前后压降增加幅度先增大后减小。

(3)排气先流经的滤芯中会沉积大部分颗粒物,后续滤芯对颗粒物沉积贡献较小。

(4)末端第1层滤芯上颗粒物覆盖面积占比最大,接近100%,孔隙截面面积占比接近0,颗粒物覆盖面积逐层减小,第1层上沉积分布最均匀,其他层沉积均匀度沿径向递减;套筒上颗粒物覆盖面积占比沿进气方向逐渐增大,第1层最末端达到最大值,为近100%,其他几层变化不大,颗粒物覆盖面积占比由内至外逐层减小,孔隙则逐层增大。

参考文献:

- [1] KOLTSAKI G C, KATSAOUNIS D K, MARKOM-ANOLAKIS I A et al. Design and application of catalyzed metal foam particulate filters; SAE 2006-01-3284 [R]. Washington, DC, USA; SAE, 2006.
- [2] KOLTSAKI G C, KATSAOUNIS D K, SAMARAS Z C, et al. Filtration and regeneration performance of a catalyzed metal foam particulate filter; SAE 2006-01-1524 [R]. Washington, DC, USA; SAE, 2006.
- [3] KOLTSAKI G C, KATSAOUNIS D K, SAMARAS Z C, et al. Development of metal foam based aftertreatment system on a diesel passenger car; SAE 2008-01-0619 [R]. Washington, DC, USA; SAE, 2008.
- [4] KOLTSAKI G C, KATSAOUNIS D K, MARKOM-ANOLAKIS I A, et al. Metal foam substrate for DOC and DPF applications; SAE 2007-01-0659 [R]. Washington, DC, USA; SAE, 2007.
- [5] LEE J M, SUNG N W, CHO G B, et al. Performance of radial type metal foam diesel particulate filters [J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(3): 307-316.
- [6] CHO G, CHOI H, JEONG Y, et al. PM reduction performance and regeneration characteristics of catalyzed metal foam filters for a 3L diesel passenger vehi-

- cle: SAE 2007-01-3456 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2007.
- [7] MYUNG C L, KIM J, JANG W, et al. Nanoparticle filtration characteristics of advanced metal foam media for a spark ignition direct injection engine in steady engine operating conditions and vehicle test modes [J]. *Energies*, 2015, 8(3): 1865-1881.
- [8] CHOI K, KIM J, KO A, et al. Size-resolved engine exhaust aerosol characteristics in a metal foam particulate filter for GDI light-duty vehicle [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2013, 57: 1-13.
- [9] BAEK S, JIN D, JANG W, et al. Evaluation of the time-resolved nanoparticle emissions and the vehicle performance characteristics for a turbocharged gasoline direct-injection vehicle with a metal-foam gasoline particulate filter [J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2016, 230(6): 745-753.
- [10] PONTIKAKIS G N, KOLTSAKI G C, STAMATELOS A M. Dynamic filtration modeling in foam filters for diesel exhaust [J]. *Chemical Engineering Communications*, 2001, 188(1): 21-46.
- [11] OHARA E, MIZUNO Y, MIYAIRI Y, et al. Filtration behavior of diesel particulate filters: 1: SAE 2007-01-0921 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2007.
- [12] MCGEEHAN J A, YEH S, COUCH M, et al. On the road to 2010 emissions: field test results and analysis with DPF-SCR system and ultra low sulfur diesel fuel [C/OL] // *Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition*. [2019-09-25]. DOI: 10.4271/2005-01-3716.
- [13] CHOI S, KYEONG L. Detailed investigation of soot deposition and oxidation characteristics in a diesel particulate filter using optical visualization: SAE 2013-01-0528 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2013.
- [14] WURZENBERGER J C, SUSANNE K, ASTRID N. Ash transport and deposition, cake formation and segregation-a modeling study on the impact of ash on particulate filter performance: SAE 2019-01-0988 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2019.
- [15] LI Z, LI Z, WU Y, et al. A simulation study on particle deposition and filtration characteristics in wall-flow DPF with inhomogeneous wall structure using a two-dimensional microcosmic model: SAE 2019-01-0995 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2019.
- [16] DAIDO S, NOBUYUKI T. Visualization of the PM deposition and oxidation behavior inside the DPF wall: SAE 2009-01-1473 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2009.
- [17] 孟忠伟, 宋蕾, 姚强, 等. 柴油机颗粒捕集器内颗粒沉积结构的实验研究 [J]. *燃烧科学与技术*, 2012, 18(1): 20-26.
- MENG Zhongwei, SONG Qiang, YAO Qiang, et al. Experimental investigation on deposition configuration of soot layer in diesel particle filter [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2012, 18(1): 20-26.
- [18] DU Y, MENG Z, FANG J, et al. Characterization of soot deposition and oxidation process on catalytic diesel particulate filter with ash loading through an optimized visualized method [J]. *Fuel*, 2019, 243: 251-261.
- [19] 孟忠伟, 杜雨恒, 李鉴松, 等. 模拟碳烟在 DPF 过滤壁面上沉积特性的试验 [J]. *内燃机学报*, 2019, 37(3): 257-264.
- MENG Zhongwei, DU Yuheng, LI Jiansong, et al. Experimental investigation on characterization of simulation soot deposited on diesel particulate filter [J]. *Transactions of CSICE*, 2019, 37(3): 257-264.
- [20] MENG Z, FANG J, PU Y, et al. Experimental study on the influence of DPF micropore structure and particle property on its filtration process [J]. *Journal of Combustion*, 2016, 2016: 1-12.
- [21] LAPUERTA M, MARTOS F J, HERREROS J M. Effect of engine operating conditions on the size of primary particles composing diesel soot agglomerates [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2007, 38(4): 455-466.
- [22] 郝斌. 不同燃料对柴油机排气颗粒物的影响研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [23] XU Z, LI X, GUAN C, et al. Effects of injection timing on exhaust particle size and nanostructure on a diesel engine at different loads [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2014, 76: 28-38.

(编辑 荆树蓉)